

УДК 535.33:621.373.8

## ВОЗНИКНОВЕНИЕ МНОГОЧАСТОТНЫХ ТОРОВ В МОДЕЛИ ШИРОКАПЕРТУРНОГО ЛАЗЕРА С ОТСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ

Шакиров А. Р.<sup>1,2</sup>, Анчиков Д. А.<sup>1</sup>, Кренц А. А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), г. Самара,

<sup>2</sup>Самарский филиал Физического института имени П. Н. Лебедева РАН, г. Самара

Одним из интересных направлений теории нелинейных динамических систем является исследование сценариев эволюции поведения в сложных системах, таких как лазеры. Ранее не сообщалось о бифуркациях квазипериодических режимов в лазерах, и сценарии эволюции системы через квазипериодические режимы, безусловно, представляют исследовательский интерес.

В качестве математической модели широкоапертурного лазера использовалась полная полуклассическая система уравнений Максвелла-Блоха. Она описывает динамику оптического поля во времени в поперечном сечении выходного пучка с учётом отстройки частоты генерации от центра линии усиления для лазера, работающего на одной продольной моде плоскопараллельного резонатора и имеющего однородно уширенную линию.

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial t} = ia\Delta_{\perp} E + \sigma(P - E), \\ \frac{\partial P}{\partial t} = -(1 + i\delta)P + DE, \\ \frac{\partial D}{\partial t} = -\gamma \left[ D - r + \frac{1}{2}(E^*P + EP^*) \right], \end{cases} \quad (1)$$

где  $E, P, D$  – безразмерные огибающие электрического поля, поляризации и инверсии населённости, соответственно;  $\gamma = \gamma_{II} / \gamma_{\perp}$  и  $\sigma = k / \gamma_{\perp}$ , где  $\gamma_{\perp}$ ,  $\gamma_{II}$  и  $k$  – скорости релаксации поляризации, инверсии населённости и коэффициент затухания электрического поля, соответственно;  $\delta = (\omega_{21} - \omega) / \gamma_{\perp}$  – отстройка частоты генерации  $\omega$  от центральной частоты линии усиления  $\omega_{21}$  линии усиления активной среды, обезразмеренная на ширину линии;  $a = c^2 / (2\omega\gamma_{\perp}d^2)$  – дифракционный параметр, где  $d$  – ширина апертуры;  $r$  – накачка, нормированная на пороговое значение. Данная нелинейная система описывает динамику генерации лазера с учётом поперечного распределения электромагнитного поля в резонаторе.

Мы рассматривали процессы в области нулевой отстройки в одномерном приближении. Для численного моделирования системы (1) использовался псевдоспектральный Фурье-метод расщепления по физическим факторам. Для анализа получаемых режимов мы строили аттрактор в фазовом пространстве, сечения Пуанкаре, а также спектр колебаний интенсивности в произвольной локальной точке.

При значениях накачки немного выше порога генерации в системе реализуется однородное по пространству стационарное решение. Однако при достижении второго лазерного порога стационарное решение теряет устойчивость по отношению к малым возмущениям с некоторым ненулевым волновым числом. В таком случае система переходит в режим периодических колебаний (рис. 1, верхний ряд).

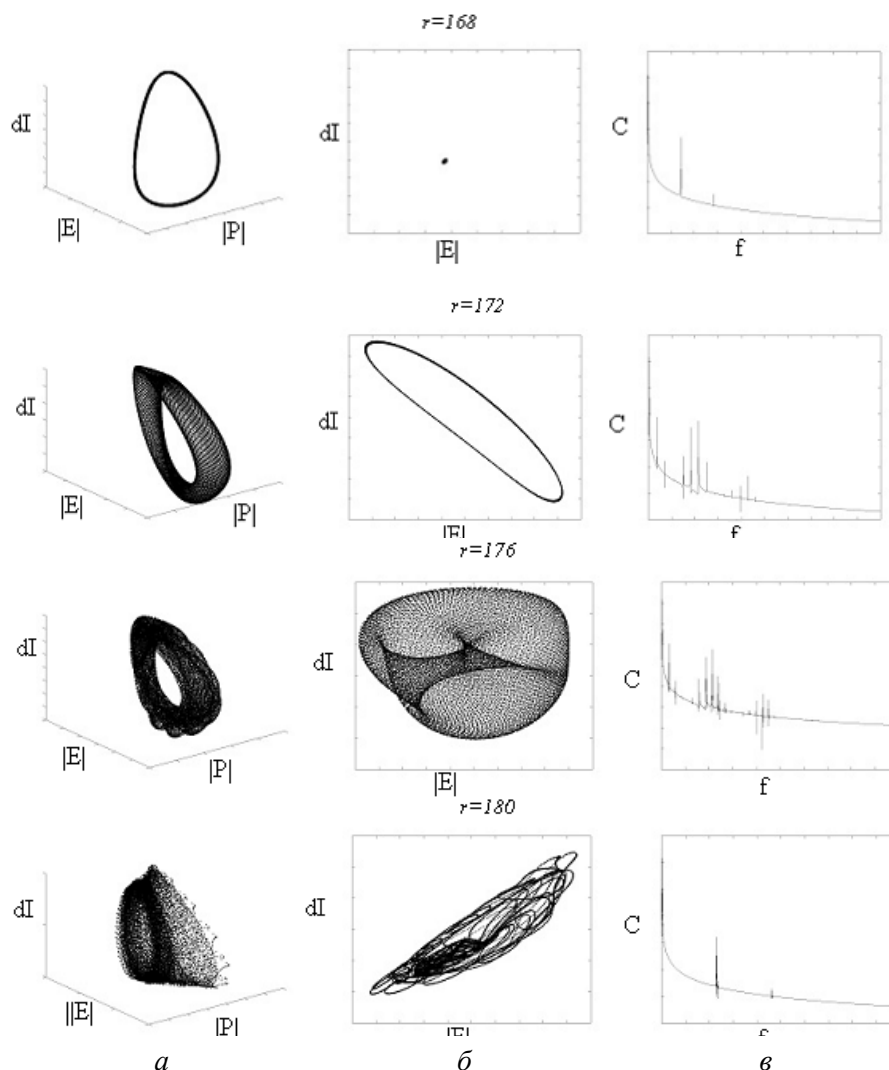


Рис. 1. Последовательность бифуркаций квазипериодических решений при изменении параметра накачки  $r$ : а) фазовый объем, б) сечения Пуанкаре, в) спектр колебаний, где  $dI$  – производная интенсивности,  $C$  – спектр мощности,  $f$  – частота. Остальные параметры системы:  $\sigma=1$ ,  $\gamma=2,2$ ,  $\delta=0$ ,  $a=0,01$

Приблизительно при значении накачки  $r=168,9$  в системе происходит бифуркация и аттрактор обретает форму трёхмерного тора (рис. 1, второй ряд сверху).

При дальнейшем увеличении накачки в области значений  $r=172,1$  на сечениях Пуанкаре наблюдаются изображения в виде двумерных проекций трёхмерного тора. Это означает, что аттрактор представляет собой трёхчастотный тор. Это подтверждается тем, что в спектре колебаний наблюдается появление третьей основной гармоники.

В области накачек  $r=177,5$  происходит ещё одна бифуркация и в фазовом пространстве аттрактор обретает более сложную форму. На сечениях Пуанкаре наблюдаются запутанные кривые. Спектр колебаний при этом меняет структуру.

Таким образом, в данной работе хотя и не полностью охвачена и раскрыта тема, тем не менее показано, что в модели широкоапертурного лазера возможно наблюдение аттракторов в виде трёхчастотных торов.

Работа частично поддержана Минобрнауки РФ в рамках Программы повышения конкурентоспособности СГАУ на 2013-2020 гг. и государственного задания вузам и научным организациям в сфере научной деятельности (проект 1451, ГР 114091840046), грантом РФФИ 14-02-31419 мол\_а.